第 37 卷第 24 期 生 态 学 报 Vol.37,No.24
2017 年 12 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Dec.,2017

DOI: 10.5846/stxb201611102280
赵薇,梁赛,于杭,邓娜.生命周期评价方法在城市生活垃圾管理中的应用研究述评.生态学报,2017,37(24):8197-8206.
Zhao W,Liang S,Yu H,Deng N.Review of life cycle assessment studies on municipal solid waste management.Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8197-8206.

生命周期评价方法在城市生活垃圾管理中的应用研究述评

赵 薇[1,*],梁 赛[2,3],于 杭[1],邓 娜[4]
1 辽宁工业大学土木建筑工程学院,锦州 121001
2 北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875
3 密歇根大学自然资源与环境学院,安娜堡 48109-1041
4 天津大学环境科学与工程学院,天津 300072

摘要:结合城市生活垃圾管理系统特征,系统归纳基于生命周期评价(Life cycle assessment,LCA)方法的城市生活垃圾管理模型的发展现状,并对 LCA 方法在城市生活垃圾管理中的实践以及在我国开展城市生活垃圾管理 LCA 研究的应用前景进行评述。分析表明,LCA 是城市生活垃圾管理领域的重要工具之一,基于 LCA 方法的城市生活垃圾管理模型在全生命周期环境影响评价与识别、处置工艺选择与改进、可持续生活垃圾管理决策支持等方面具有十分重要的应用价值。中国在本地化生活垃圾管理系统 LCA 模型开发、清单数据库和评价指标体系构建以及与其他研究方法集成等方面面临挑战。

关键词:城市生活垃圾;生命周期评价;废物管理;可持续性

Review of life cycle assessment studies on municipal solid waste management

ZHAO Wei[1,*],LIANG Sai[2,3],YU Hang[1],DENG Na[4]
1 *School of Civil Engineering and Architecture,Liaoning University of Technology,Jinzhou* 121001,*China*
2 *State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control,School of Environment,Beijing Normal University,Beijing* 100875,*China*
3 *School of Natural Resources and Environment,University of Michigan,Ann Arbor* 48109-1041,*United States*
4 *School of Environmental Science and Technology, Tianjin University,Tianjin* 300072,*China*

Abstract: Considering the characteristics of municipal solid waste (MSW) management systems, this study conducted a thorough overview of life cycle assessment (LCA)-based models that can be used to support policy decisions on MSW management. A number of MSW management practices using LCA-based models were reviewed at different levels. The application foreground of LCA-based models in China's MSW management was also discussed. This study assessed the applications of LCA-based models in MSW management. We found that LCA is one of those important systematic tools that can be used to support MSW management. LCA models are important to the assessment and identification of life cycle environmental impacts of MSW treatment technologies, the choices and improvements of those technologies, and the policy decisions for MSW management. China is facing great challenges in LCA studies on MSW management, including the development of China-specific MSW management models, the construction of China-specific life cycle inventory databases and life cycle environmental impact indicator systems for MSW, and the integration of interdisciplinary methods.

Key Words: municipal solid waste;life cycle assessment;waste management;sustainability

基金项目:国家自然科学基金项目(41201583);辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013069)
收稿日期:2016-11-10; **网络出版日期:**2017-08-15

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaowei_lnit@126.com

城市生活垃圾是指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物[1],具有来源广、产生量大及组成成分多样等特点。据统计,全球目前每年城市生活垃圾产生量为 13 亿 t,预计到 2050 年将达到 22 亿 t[2];从国家层面来看,美国 2013 年城市生活垃圾产生量为 2.54 亿 t[3],欧盟 28 国 2013 年城市生活垃圾产生量为 2.42 亿 t[4],我国 2014 年城市生活垃圾清运量为 1.97 亿 t[5]。与发达国家相比,我国城市生活垃圾无害化处理率和资源化利用率低、处理能力不足、管理水平存在明显差距[6,7]。随着我国城镇化进程的推进,科学、有效地开展城市生活垃圾管理日益重要。我国"十三五"规划纲要提出包括城市生活垃圾在内的环境综合治理思路[8];同时,"十三五"国家科技创新规划中列入资源循环基础理论与模型及固废循环利用管理与决策技术的研究内容[9]。

城市生活垃圾管理系统是一个具备环境、经济和社会要素的复杂系统,不仅与城市生活垃圾处理技术相关,也涵盖收集、运输、循环利用及最终处置的各个阶段,并且与大气污染、水污染、土壤污染、人体健康及资源消耗等环境影响紧密联系。因此,从全生命周期的角度诠释可持续城市生活垃圾管理是十分必要的。生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)能够综合考虑功能单元(产品或服务)产品或功能生命周期全过程(从摇篮到坟墓,包括原料获得、制造、运输、使用、废弃处理)产生的环境影响。各国学者基于 LCA 方法对废物管理系统进行深入研究,使其成为 LCA 重要应用领域之一[10-13]。与国外相比,LCA 在我国生活垃圾管理领域的应用尚处于起步阶段。系统评述 LCA 方法在城市生活垃圾管理的应用,有助于促进 LCA 方法在我国城市生活垃圾处理技术创新、管理系统设计及决策支持方面的应用。

本文首先回顾基于 LCA 方法城市生活垃圾管理模型的发展现状及研究进展,然后综述 LCA 方法在城市生活垃圾管理领域的实践,最后提出 LCA 方法在我国城市生活垃圾管理领域的不足之处。

1 生命周期评价简介

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价[14]。LCA 研究框架包括目标和范围定义(Goal and scope definition)、清单分析(Inventory analysis)、影响评价(Impacts assessment)和解释(Interpretation)4 个相互作用的阶段。

LCA 研究可以追溯至 20 世纪 60 年代末。1969 年,美国中西部研究所对可口可乐公司饮料包装从资源开采到废物最终处置的全生命周期进行评价,评价指标包括资源消耗、污染物排放和最终废弃物排放[15]。随后,美国、瑞士等研究机构开展了类似研究。然而,LCA 概念、定义及结果在该阶段的发展呈现多样性,限制了 LCA 分析工具的普遍应用。

20 世纪 90 年代是 LCA 标准化发展阶段。国际毒物和化学学会工作组侧重 LCA 框架、定义及方法学的发展及融合,发布 LCA 指南[16];国际标准化组织利用标准化方法和程序,颁布 ISO14040 和 ISO14044 国际标准[14,17]。同时,LCA 作为政府决策工具在包装领域得到应用,例如欧盟包装指令[18]和日本包装法案[19]。

进入 21 世纪以来,LCA 越来越受到产业界、政府、国际组织及科研机构的关注。2002 年联合国环境署和国际毒物和化学学会联合发起国际合作的生命周期计划(Life cycle initiative)[20];2003 年欧盟整合性产品政策(Integrated product policy)中强调 LCA 方法的应用[21];欧盟、美国、澳大利亚等建立国家层面的 LCA 网络平台[20,22-23];LCA 方法学进一步得到完善,数据库及软件[24-27]不断丰富;LCA 在政策制定、产品设计和废物管理等领域应用愈加广泛。经过 40 余年的发展,LCA 已成为重要的可持续管理工具之一,进入传播与实践阶段[15]。

2 基于生命周期评价方法的城市生活垃圾管理模型

随着对城市生活垃圾管理认识的不断深入,学术界开始借助系统工具分析城市生活垃圾管理系统的环境、经济及社会影响[10-12,28,29]。相关学者基于 LCA 方法量化城市生活垃圾管理系统的环境影响,对比不同处理技术的优劣,并针对城市生活垃圾管理系统开发评价模型。基于 LCA 方法的城市生活垃圾管理模型可以

分为 4 类:基于过程的生命周期评价模型、环境投入产出—生命周期评价模型、经济—生命周期评价模型和物质流—生命周期评价模型。基于过程的生命周期评价模型对应常规 LCA,而另外 3 类模型可看作是常规 LCA 的衍生与扩展。

2.1　基于过程的生命周期评价模型

基于过程的 LCA 模型是通过自下而上的方法收集城市生活垃圾管理系统各个过程的完整物质/能量清单(直接和间接物质/能量使用与排放),进行数据计算,最终将物质/能量清单转化为环境影响。自 20 世纪 90 年代以来,学者尝试将 LCA 与废物管理相结合,开发了众多基于过程的 LCA 模型,如:EPIC/CSR IWMM (Integrated Waste Management Model for life cycle analysis by EPIC/CSR)[30-31]、MSW-DST(Municipal Solid Waste Decision Support Tool)[32-33]、IWM2 (Integrated Waste Management 2)[34]、ORWARE (ORganic WAste REsearch)[35-36]、EASEWASTE(Environmental Assessment System for Environmental Technologies)[37]及 LCA-IWM (基于欧盟第五框架项目 The Use of Life Cycle Assessment Tool for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and Regions with Rapid Growing Economies 开发)[38]等。随着 LCA 方法的成熟,这类模型在废物管理领域得到广泛应用。

与产品的生命周期不同,城市生活垃圾管理的生命周期不包含原料获取、产品制造、使用阶段,而是从城市生活垃圾进入城市生活垃圾管理系统开始,包含收集运输、各种处理处置过程及相关能源和材料的生产过程。城市生活垃圾管理相关的各个单元过程是基于过程的 LCA 模型的构建要素。通常,可将单元过程分为前景过程和背景过程两类[39,40]。前景过程与城市生活垃圾管理直接相关,如收集运输过程和回收、再利用、最终处置等各种垃圾处理处置过程,前景过程产生直接环境影响;背景过程为前景过程提供所需要的物质、能源输入,背景过程产生间接环境影响。本文从前景过程(包括收集运输过程、处理处置过程)、背景过程、垃圾组分数量、影响类型及适用地区等角度出发,对上述 6 种模型的特征进行归纳整理(表 1)。

表 1　基于过程的城市生活垃圾管理系统生命周期评价模型特征

Table 1　Characteristic of process-based LCA models for municipal solid waste management system

模型名称 Model	收集运输过程 Collection & transportation	处理处置过程 MSW treatment processes	背景过程 Background processes	组分数量 Number of compositions	影响类型 Impact category	适用地区 Region
EPIC/CSR IWMM	车辆类型、运输距离、油耗	物质回收、焚烧、填埋、堆肥、厌氧发酵、渗滤液处理	燃油、水、电、辅助材料的生产	7	环境影响:资源消耗、气候变化、酸化、烟雾、人体健康、水体质量、土地使用;经济影响	加拿大
MSW-DST	收集容器类型、车辆类型及数量、收集频率等	物质回收、焚烧、填埋、堆肥、渗滤液处理	燃油、电的生产,建设过程	48	环境影响:能源消耗、气候变化、富营养化、酸化、烟雾、人体健康;经济影响	美国
IWM2	收集容器类型、车辆类型、运输距离、油耗	物质回收、焚烧、填埋、堆肥、厌氧发酵、渗滤液处理、垃圾衍生料回收	燃油、电的生产	9	经济影响	英国
ORWARE	车辆类型及数量、收集频率等	物质回收、焚烧、填埋、堆肥、厌氧发酵、渗滤液处理、热解、肥料使用	燃油、水、电、辅助材料的生产	22(有机垃圾)	环境影响:能源消耗、气候变化、富营养化、酸化、人体健康、光化学臭氧合成;经济影响	瑞典
EASEWASTE	收集容器类型、车辆类型、运输距离、油耗	物质回收、焚烧、填埋、堆肥、厌氧发酵、渗滤液处理、肥料使用	燃油、水、电、辅助材料的生产,建设过程	48	环境影响:气候变化、富营养化、酸化、人体毒性、生态毒性	丹麦
LCA-IWM	收集容器类型、车辆类型及数量、收集运输频率等	物质回收、焚烧、填埋、堆肥、厌氧发酵、有氧机械生物处理、无氧机械生物处理、渗滤液处理、肥料使用	燃油、电、辅助材料的生产	11	环境影响:资源消耗、气候变化、富营养化、酸化、人体毒性、光化学臭氧合成;经济影响;社会影响	欧盟

从表 1 可看出：

（1）城市生活垃圾主要处理处置过程包括物质回收、焚烧、填埋、堆肥、厌氧发酵等单一处理过程及多种处理过程的组合。由于生活垃圾理化特性及垃圾处理技术水平不同，相同处理技术在不同模型中存在差异。上述模型中既提供了各个垃圾处理过程的缺省参数，也可以由用户输入，扩大了模型的适用范围。

（2）收集运输过程的差异在于是否考虑垃圾收集容器及运输过程环境影响计算方法。MSW-DST、IWM2、EASEWASTE 及 LCA-IWM 模型考虑了采用不同垃圾收集容器的环境影响。在运输过程方面，EPIC/CSR IWMM、EASEWASTE、IWM2 模型根据用户输入的运输距离和油耗直接计算环境影响；而 MSW-DST、ORWARE 及 LCA-IWM 模型根据用户输入的车辆数量、频率等参数首先计算运输距离和油耗，然后计算相应的环境影响。

（3）背景过程均包含燃油和电的生产过程，其他物质、能源生产过程及建设过程因模型而异。在上述模型中，EASEWASTE 包含的背景过程最丰富。

（4）垃圾组分决定了垃圾理化特性，直接影响垃圾处理技术的选择。在上述模型中，MSW-DST 和 EASEWASTE 模型包含的垃圾组分最多，ORWARE 模型包含 22 种有机垃圾组分。各个模型中垃圾组分数据一般来源于模型适用地区的平均水平。

（5）对于环境影响而言，不同模型采用的生命周期环境影响评价（Life cycle impact assessment，LCIA）模型不同，涉及的环境影响类型也存在差异。气候变化、富营养化、酸化、人体毒性是上述 6 种模型的共同关注点。IWM2 模型评价结果以生命周期清单（Life cycle inventory，LCI）的形式表示，不包含环境影响。

（6）基于过程的城市生活垃圾管理系统 LCA 模型具有地域性差异。上述模型的适用地区为欧美国家，模型所涉及的数据、处理技术及政策措施等也符合欧美国家的实际情况。如果直接利用上述模型开展我国城市生活垃圾 LCA 分析，需要对模型的适用性进行详细讨论，以保证评价结果的客观性。

除了上述专门用于城市生活垃圾管理的 LCA 模型外，一些通用 LCA 计算软件和基础数据库（如 SimaPro[24]、GaBi[26]、Ecoinvent[27]、ELCD[25]等）也包含生活垃圾处理过程，可用于城市生活垃圾管理系统 LCA 分析。

基于过程的城市生活垃圾管理系统 LCA 模型在欧美国家有比较成熟的软件。目前，针对该类模型的研究集中在如何减小评价结果的不确定性以及丰富评价指标方面，上述问题也是 LCA 方法学研究的热点。由于我国 LCA 研究起步晚，建立本地化的城市生活垃圾管理系统 LCA 模型变得十分迫切。

2.2 环境投入产出—生命周期评价模型

基于过程的 LCA 模型通过自下而上的方式收集各个单元过程的数据，由于数据可获得性和工作量的限制，难以向上追溯所有产业链环节。忽略上游产业链环节的输入及相关环境影响所产生的误差为 LCA 的“截断误差”[41]。环境投入产出（Environmentally-extended input-output，EEIO）模型与 LCA 联合应用，为解决“截断误差”或“系统边界”选择问题提供方法[42]。

EEIO 模型由投入产出（Input-output，IO）模型和描述各个部门环境影响指标的卫星账户构成[43]。与 LCA 模型不同，EEIO 模型是一个自上而下的过程，包含经济系统内所有的供应链路径，可以计算由某一部门的最终需求导致的供应链路径累积环境影响，从而扩展系统边界。然而，EEIO 模型描述的是部门的平均水平，难以描述具体产品的环境影响[44]。综合考虑两种方法的优势，相关研究者将 EEIO 模型与 LCA 模型结合，建立环境投入产出—生命周期评价（Environmental Input-Output Life Cycle Assessment，EIO-LCA）模型。EIO-LCA 模型一方面保留具体产品的特性，另一方面统一了产品系统的边界，因此，评价结果更具有可比性[42]。关于 EIO-LCA 模型具体概念和数学关系的描述，请见 Suh 等[41-42]和 Liang 等[45-47]的研究。

废物管理领域，现有研究多利用 EEIO 模型揭示由最终需求驱动的废物在产品供应链上的隐含流动过程及其累积环境影响。但是，利用 EIO-LCA 模型进行城市生活垃圾管理系统的研究还不多见。其中，代表性成果是 Nakamura 及其团队开发的日本废物投入产出（Waste input-output，WIO）模型[48]。WIO 模型包含生活及

工业垃圾组分共 79 种、国民经济部门 104 个、处理技术 3 类,并在日本开展了针对城市生活垃圾、电子垃圾等废物管理策略的案例分析。此外,Liang 等采用实物型投入产出表,建立了废纸循环利用的 EIO-LCA 模型[49];计军平等核算了我国 2007 年废弃资源和废旧材料回收加工业等 43 个部门的温室气体排放量[50]。

2.3　经济—生命周期评价模型

随着对城市生活垃圾管理系统复杂性的认识,基于 LCA 方法的城市生活垃圾管理模型由早期的单一环境影响评价扩展到经济和社会影响多维度评价。迄今为止,生命周期经济评价和社会评价方法还未标准化,研究者在指标选择、边界定义、均一化方法等方面还存在分歧[51]。在城市生活垃圾管理领域,部分模型同时考虑环境影响和经济影响,涉及社会影响评价的模型较少。目前,在 LCA 领域应用较为广泛的经济影响评价工具有生命周期成本分析(Life cycle costing,LCC)及成本效益分析(Cost benefit analysis,CBA)两类。

LCC 考虑研究系统整个生命周期中所有相关的成本因素,如购置成本、使用成本、维护维修成本、储运成本、重置成本、折旧以及报废回收或处置成本等。LCC 与 LCA 具有相似的模型结构及功能单元,在方法学上相互呼应。在 LCA 与 LCC 结合方面,研究者开展了许多讨论,常见方法有两种。第一种是将 LCA 得到的环境影响指标与 LCC 得到的经济影响指标分别标准化,消除量纲差异后综合为单一生态效率指标(Eco-efficiency indicator)[52-56]。第二种是将 LCA 得到的环境影响指标以货币形式加权,得到环境生命周期成本指标(Environmental life cycle cost indicator),然后与 LCC 分析得到的经济影响指标进行对比或合计[57]。

CBA 基于福利经济学,通过比较投资的全部成本和全部效益来评估投资价值,其核心假设是任何收益和成本都可以货币化。在城市生活垃圾管理领域,利用 CBA 将 LCA 得到的城市生活垃圾管理系统的环境影响(包括外部成本及外部收益)内部化,以货币单位指标展示结果。这种方法综合了经济的内部性和环境的外部性[58,59]。

对比可见,CBA 试图量化经济系统中所有利益方的成本与效益,目标在于使得社会福利最大化;而 LCA 结合 LCC 仅涉及与研究系统直接相关的利益方,目标是在减小环境影响的前提下提高经济收益。两类方法各有侧重,在实际应用中应依据所解决问题的需要来选择合适的经济—生命周期评价模型。

2.4　物质流—生命周期评价模型

物质流分析(Material flow analysis,MFA)是指在一定时空范围内关于特定系统的物质流动和贮存的系统性分析,是研究经济生产活动中物质资源新陈代谢的一种工具[60]。MFA 追踪物质的开采、生产、转移、分配、消耗、循环、废弃等过程,其所揭示的物质流动过程与物质的生命周期概念是一致的。将 MFA 与 LCA 结合为物质流—生命周期评价(MFA-LCA)模型,可以弥补 MFA 仅考虑物质流动而缺乏环境影响信息的弊端,从物质流动与环境影响两个方面提供决策信息[61-62]。

在城市生活垃圾管理领域,MFA-LCA 模型的构建可以从微观与宏观两个层面开展。在微观层面,MFA 用于创建生命周期清单的方法,追踪元素流动特征及转化效率,如生活垃圾焚烧发电过程典型元素迁移系数计算[63]、有机垃圾不同处理过程重金属及营养元素迁移系数计算[64-65]等。在宏观层面,MFA 可用于延伸传统 LCA 的系统边界,向前追溯物质开采、生产、消耗过程,并揭示物质管理与废物管理两个领域的相互作用。相关研究包括,Rochat 等建立废塑料回收系统的 MFA-LCA 模型,分析不同回收策略的环境影响[66];Sevigné-Itoiz 等建立西班牙废纸回收系统 MFA-LCA 模型,计算温室气体排放[67]。已开展的 MFA 多为大尺度分析,加强中小尺度(如城市、工业园区等)的 MFA 研究可以使 MFA 与 LCA 联合评价的结果更有意义。

3　生命周期清单数据库

生命周期清单(Life Cycle Inventory,LCI)数据库是开展 LCA 研究与应用的基础,“数据库缺失”被认为是阻碍我国开展 LCA 研究与应用的首要问题[68]。利用 LCA 开展城市生活垃圾管理系统研究,需要 LCI 基础数据库、城市生活垃圾管理行业 LCI 数据库及其他相关数据库的支撑。

3.1　LCI 基础数据库

LCI 基础数据库包含各种主要单元(生产)过程的清单数据及相应产品的生命周期清单。目前,国际上广

泛使用的 LCI 基础数据库主要有瑞士 Ecoinvent 数据库[27] 和欧盟 ELCD 数据库[25]。Ecoinvent 数据库包含了 10000 多个单元过程及 2000 多个清单物质,涵盖了能源、运输、建材、化工、农业及废物管理等行业领域[27]。ELCD 数据库包含了 500 多个生命周期清单、200 多种清单物质及 28 个环境影响类型,来源于欧盟范围的主要原料、能源、运输及废物管理行业[25]。

目前,我国开发的 LCI 基础数据库主要包括四川大学和亿科环境科技的中国生命周期核心数据库[68]、北京工业大学的中国材料生命周期分析数据库[69]等。与国外相比,我国 LCI 基础数据库在建模方法及单元(生产)过程/产品、清单物质、环境影响类型数量积累等方面仍有较大差距,丰富我国 LCI 基础数据库以满足我国日益增多的 LCA 案例分析需要。

3.2 城市生活垃圾管理行业 LCI 数据库

各类基于过程的城市生活垃圾管理系统生命周期评价模型包含众多的单元过程数据(如表 1 所示),国外 LCI 基础数据库中一般都涵盖废物管理领域。国外数据库可以为我国城市生活垃圾管理提供参考,但由于技术水平等差异,直接应用其单元过程,必然导致评价结果与实际情况不符。

目前,我国城市生活垃圾管理行业 LCI 数据库的系统建设尚未开始。考虑我国废物管理政策关注的重点,兼顾生活垃圾的特性、技术适用性及技术水平等因素,建立符合国际规范的本土化城市生活垃圾管理行业 LCI 数据库变得日益重要。

3.3 其他相关数据库

应用环境投入产出—生命周期评价模型需要 EEIO 数据库的支撑。相关学者已在数据库构建方面开展大量工作,已经构建美国、加拿大、英国、欧盟 25 国、中国和日本等国 EIO 数据库[70-72]。上述数据库也为 EIO-LCA 在城市生活垃圾管理领域的应用提供基础数据平台。

值得提出的是,Liang 等构建的中国环境投入产出(Chinese environmentally extended input-output,CEEIO)数据库[70],是我国目前最全面的 EEIO 数据库。CEEIO 数据库涵盖 200 多个资源环境指标、多个时间节点和多种部门分类。然而,由于相关统计数据较稀缺,连续时间序列和详细部门分类(例如欧美统计体系中约 500 部门分类)[44]仍是 CEEIO 数据库面临的挑战。

应用物质流—生命周期评价模型需要 MFA 数据库支撑。然而,目前公开的 MFA 数据库十分缺乏,针对不同区域和行业,构建基础物质代谢数据库十分必要[60]。

4 生命周期评价方法在城市生活垃圾管理中的实践

随着理念和方法的不断成熟,LCA 已成为广泛接受的废物管理工具之一,在城市生活垃圾管理。系统的实践越来越丰富。国内外已有的 LCA 方法在城市生活垃圾管理领域的实践可以分为 3 个层面:(1) 城市生活垃圾管理系统的环境影响分析,(2) 城市生活垃圾处置工艺的选择、研发与改进,(3) 城市生活垃圾管理政策与规划决策支持。

4.1 环境影响分析

研究内容主要是分析城市生活垃圾管理系统在收集、运输、处置等生命周期各个阶段的环境影响,并识别产生环境影响的污染物来源及相对贡献。研究可针对某一环境影响类别或多种环境影响类别。目前,城市生活垃圾管理所关注的环境影响类型集中在气候变化、酸化、富营养化、生态毒性、人体毒性等。

国外方面,Eriksson 等[28]基于 ORWARE 评价不同的城市生活垃圾处理方式组合,强调与垃圾处理系统相关的其他外部系统,如热、电、运输等生产系统,对城市生活垃圾管理系统的环境影响的作用。Finnveden 等[29]强调从生命周期角度指出垃圾处理的重要性,通过计算指出填埋过程所释放的污染物对生活垃圾管理系统的环境影响显著。Weitz 等[73]和 Gentil 等[74]分别计算了美国和丹麦等 6 个欧盟国家城市生活垃圾处理过程中的温室气体排放情况。

国内方面,徐成等[75]在我国率先开展了城市生活垃圾管理系统的清单分析、影响评价和改善评价的研

究,并以四川广汉市为例进行研究,指出综合处理模式优于单一处理模式。随后,苏州[76]、大连[77]、北京[78]、杭州[79]等城市开展了相关研究。此外,Hong 等[80]对比了我国焚烧、填埋、堆肥+填埋、堆肥+焚烧四种生活垃圾处理方式的环境影响,Zhao 等[55,81]以天津市为例开展了城市生活垃圾管理系统的温室气体减排分析。

由于我国本地化 LCIA 指标体系尚未健全,国内研究多采用国外的标准化因子和权重因子对不同环境影响进行综合评价,此外,在 LCIA 模型和评价指标选择方面还存在分歧[82]。建立全面的中国本地化 LCIA 指标体系,能够满足我国开展 LCA 研究的需求,并有助于消除 LCIA 阶段产生的不确定性。

4.2　处置工艺选择、研发与改进

城市生活垃圾组分多样,垃圾处置工艺本身包含众多的单元过程,具有多输入、多产出的特征。若进一步考虑垃圾处置工艺与能源生产、制造及农业产生等其他过程的相互联系,研究系统将更加复杂。利用 LCA 可以帮助回答如(1)选择何种工艺可以减小城市生活垃圾管理系统产生的环境影响;(2)哪些因素决定了处置工艺产生的某种环境影响;(3)是否存在不同环境影响转移等问题。此外,LCA 与 EIO、LCC、CBA、MFA 等工具结合,可以为城市生活垃圾处置工艺的选择、研发和改进提供更全面的信息。

从国内外已有文献看,焚烧、填埋、回收、堆肥和厌氧发酵是主要的城市生活垃圾处置工艺。在处置工艺选择方面,不同研究报道的结论不尽相同,但呈现一定趋势,如多数研究[12,80,81,83,84]指出(1)混合垃圾焚烧优于填埋;(2)废纸和废塑料回收优于焚烧和填埋;(3)有机垃圾堆肥和厌氧发酵的优势更为明显。不同研究结论的差异主要来源于城市生活垃圾理化特性(如热值、含水量、可回收组分等)、处置工艺水平(如填埋气收集率、发电效率等)、系统边界定义及 LCIA 方法选择等。

为了更准确地模拟垃圾处置工艺,减少不确定性,建立符合我国国情的生活垃圾处置工艺单元过程的 LCA 数据库是十分必要的。此外,开展不确定性分析进而识别不确定性大的数据进行重点研究,也是保证分析结果可靠的措施。

4.3　政策制定与决策支持

LCA 方法可以为区域、城市和国家层面的废物管理提供定性和定量信息,有助于废弃管理的政策制定与决策支持方面。建立在“4Rs”(Reduce,reuse,recycle,and recover)基础上的废物层级管理(Waste hierarchy)是目前普遍接受的废物管理理念[2]。然而,由于实践的具体条件不同,废物层级的适用性可能有所变化。LCA 方法是进行废物管理实证分析的有效工具。

欧盟、美国等国家较早地推动废物管理的 LCA 研究,并将研究结果应用于国家政策制定方面。欧盟于 2008 年修订《废物框架指令》,进一步强调废物减量化和增值化[85],并在技术报告中将生命周期思想(Life cycle thinking)和 LCA 作为执行《废物框架指令》的工具[86]。美国《资源保护与回收法》将废物管理的重点由末端治理前移到源头管理,并将 LCA 作为对比不同管理策略温室气体排放的工具[87]。此外,许多区域和城市层面的生活垃圾管理 LCA 案例研究不断涌现。

我国应用 LCA 对废物管理系统进行决策支持还处于起步阶段,研究内容多侧重于案例分析。但值得提出的是,随着国际上 LCA 方法学的成熟及社会发展的需要,生命周期理念已经进入国家政策体系,比如国务院《中国制造 2025》提出“加强产品全生命周期绿色管理”,工信部《工业绿色发展规划(2016—2020)》提出建立“绿色制造标准体系”及“绿色设计与评价得到广泛应用”。此外,国家发改委、环保部、住建部多项文件中鼓励低碳循环发展、产品生态设计、绿色供应链等,都将推动 LCA 方法在我国废物管理领域的发展和应用。

5　总结与展望

LCA 作为系统分析的工具,将其引入城市生活垃圾管理系统,可以刻画城市生活垃圾处理处置生命周期过程的全景图,有助于识别城市生活垃圾管理过程的直接和间接环境影响,促进垃圾处置工艺改进,为城市生活垃圾减量化、再利用、再循环、资源化的可持续管理提供决策支持。通过回顾近年来国内外基于 LCA 方法的城市生活垃圾管理模型及实践,提出以下几点建议:

(1) 推进 LCA 方法在我国城市生活垃圾管理领域的应用。LCA 在欧洲、美国等发达国家城市生活垃圾管理中的研究与应用比较成熟,在我国仍处在起步阶段。城市生活垃圾管理受垃圾理化性质、经济水平、技术水平、能源结构、自然条件以及传统习惯等多方面因素影响,需要针对我国国情和地区特征开展城市生活垃圾管理 LCA 理论与实践研究。

(2) 注重 LCA 与其他研究方法集成,丰富经济和社会影响评价的内涵。生命周期可持续性分析(Life cycle sustainability analysis,LCSA)是 LCA 发展的方向之一,LCSA 提出的框架包含可持续发展中环境、经济和社会三个维度。此外,通过多种研究方法(如 EIO、MFA、LCC、CBA 等)集成,可以将研究对象从微观层面的特定废物组分或特定城市生活垃圾管理系统,扩展到包含相关产品或技术的中观层面和多区域经济范围的宏观研究。

(3) 构建并完善我国本地化 LCA 数据库。目前,国内开展城市生活垃圾 LCA 研究在很大程度上受限于数据的可得性和可信度,在数据收集方面依赖于国外数据库和假设,降低了结果的可靠性。尽快建立并完善符合我国国情的城市生活垃圾管理行业数据库,并不断充实 LCA、EIO、MFA 等基础数据库是非常必要的。

参考文献(References):

[1] 国务院. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法. 北京: 国务院, 2004.
[2] Hoornweg D, Bhada-Tata P. What A Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Washington, DC: World Bank, 2012.
[3] U.S. EPA. EPA's annual MSW characterization reports. (2015). https://www.epa.gov/smm/advancing-sustainable-materials-management-facts-and-figures.
[4] Eurostat. Eurostat yearbook. (2016-12-09). http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do? dataset=env_wasmun.
[5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2014. 北京: 中国统计出版社, 2014.
[6] 聂永丰. 低碳经济下的城市垃圾处理. 建设科技, 2006, (17): 68-70.
[7] Chen X D, Geng Y, Fujita T. An overview of municipal solid waste management in China. Waste Management, 2010, 30(4): 716-724.
[8] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要. 北京: 国务院, 2016.
[9] 国务院. "十三五"国家科技创新规划. 北京: 国务院, 2016.
[10] Ekvall T, Assefa G, Björklund A, Eriksson O, Finnveden G. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. Waste Management, 2007, 27(8): 989-996.
[11] Finnveden G. Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems. Resources, Conservation and Recycling, 1999, 26(3/4): 173-187.
[12] Laurent A, Bakas I, Clavreul J, Bernstad A, Niero M, Gentil E, Hauschild M Z, Christensen T H. Review of LCA studies of solid waste management systems-part I: lessons learned and perspectives. Waste Management, 2014, 34(3): 573-588.
[13] 王寿兵, 胡聃, 吴千红. 生命周期评价及其在环境管理中的应用. 中国环境科学, 1999, 19(1): 77-80.
[14] International Organization for Standardization. ISO 14040: 2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
[15] Guinée J B, Heijungs R, Huppes G, Zamagni A, Masoni P, Buonamici R, Ekvall T, Rydberg T. Life cycle assessment: past, present, and future. Environmental Science & Technology, 2011, 45(1): 90-96.
[16] Society of Environmental Toxicology Chemistry. Guidelines for life-cycle assessment: a "code of practice"//SETAC Workshop held at Sesimbra, Portugal. Pensacola, Florida, U.S.A., Brussels, Belgium: SETAC, 1993.
[17] International Organization for Standardization. ISO 14044: 2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
[18] European Union. Council Directive 94/62/CE of 20 December 1994, Official Journal of the European Union, L 365, 1994-12-31.
[19] Hunkeler D, Yasui I, Yamamoto R. LCA in Japan: policy and progress. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3(3): 124-130.
[20] Life cycle initiative. (2016-10-09). http://www.lifecycleinitiative.org/.
[21] Commission of the European Communities. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Integrated product policy. Building on environmental life-cycle thinking. Report COM (2003) 302 final. Brussels: Commission of the European Communities, 2003.
[22] ALCAS australian life cycle assessment society. (2016-07-11). http://www.alcas.asn.au/.
[23] ACLA american center for life cycle assessment. (2016-10-9). http://www.aclca.org/about/.
[24] Software to measure and improve the impact of your product life cycle. (2016-10-09). http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software.
[25] Directorate General Joint Research Centre (JRC) European Commission. European reference life cycle database (ELCD), 2007.
[26] PE-international. GaBi. (2016-10-09). http://www.gabi-software.com.

[27] Ecoinvent. Ecoinvent database v3. (2016-10-9). http://www.ecoinvent.org/database/database.html.
[28] Eriksson O, Reich M C, Frostell B, Björklund A, Assefa G, Sundqvist J O, Granath J, Baky A, Thyselius L. Municipal solid waste management from a systems perspective. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(3): 241-252.
[29] Finnveden G, Albertsson A C, Berendson J, Eriksson E, Höglund L O, Karlsson S, Sundqvist J O. Solid waste treatment within the framework of life-cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 1995, 3(4): 189-199.
[30] Christensen T H. Solid Waste Technology and Managemen.West Sussex: Wiley-Blackwell, 2011.
[31] University of Waterloo. Integrated waste management model (IWM) for municipalities. (2016-10-9). https://uwaterloo.ca/integrated-waste-management-model-for-municipalities/.
[32] Weitz K, Barlaz M, Ranjithan R, Brill D, Thorneloe S, Ham R. Life cycle management of municipal solid waste. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, 4(4): 195-201.
[33] Solano E, Ranjithan S R, Barlaz M A, Brill E D. Life-cycle-based solid waste management. I: model development. Journal of Environmental Engineering, 2002, 128(10): 981-992.
[34] McDougall F R, White P R, Franke M, Hindle P. Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory. 2nd ed. Oxford: John Wiley & Sons, 2001.
[35] Dalemo M, Sonesson U, Björklund A, Mingarini M, Frostell B, Jönsson H, Nybrant T, Sundqvist J O, Thyselius L. ORWARE-a simulation model for organic waste handling systems. Part 1: model description. Resources, Conservation and Recycling, 1997, 21(1): 17-37.
[36] Eriksson O, Frostell B, Björklund A, Assefa G, Sundqvist J O, Granath J, Carlsson M, Baky A, Thyselius L. ORWARE—a simulation tool for waste management. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 36(4): 287-307.
[37] Kirkeby J T, Birgisdottir H, Hansen T L, Christensen T H, Bhander G S, Hauschild M. Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. Waste Management & Research, 2006, 24(1): 3-15.
[38] den Boer J, den Boer E, Jager J. LCA-IWM: a decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. Waste Management, 2007, 27(8): 1032-1045.
[39] Guinée J B. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
[40] SETAC. Life cycle terminology. (2016-10-9). http://www.lifecycleinitiative.org/resources/life-cycle-terminology-2/#b.
[41] Suh S. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model. Ecological Economics, 2004, 48(4): 451-467.
[42] Suh S, Lenzen M, G J, Hondo H, Horvath A, Horvath G, Jolliet O, Klann U, Krewitt W, Moriguchi Y, Munksgaard J, Norris G. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches.Environmental Science & Technology, 2004, 38(3): 657-664.
[43] Miller R E, Blair P D. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
[44] 梁赛, 王亚菲, 徐明, 张天柱. 环境投入产出分析在产业生态学中的应用. 生态学报, 2016, 36(22): 7217-7227.
[45] Liang S, Xu M, Zhang T Z. Life cycle assessment of biodiesel production in China. Bioresource Technology, 2013, 129: 72-77.
[46] Liang S, Xu M, Zhang T Z. Unintended consequences of bioethanol feedstock choice in China. Bioresource Technology, 2012, 125: 312-317.
[47] Liang S, Xu M, Suh S, Tan R R. Unintended environmental consequences and co-benefits of economic restructuring. Environmental Science & Technology, 2013, 47(22): 12894-12902.
[48] Nakamura S, Kondo Y. Input-output analysis of waste management. Journal of Industrial Ecology, 2002, 6(1): 39-63.
[49] Liang S, Zhang T Z, Xu Y J. Comparisons of four categories of waste recycling in China's paper industry based on physical input-output life-cycle assessment model. Waste Management, 2012, 32(3): 603-612.
[50] 计军平, 刘磊, 马晓明. 基于 EIO-LCA 模型的中国部门温室气体排放结构研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 741-749.
[51] Wood R, Hertwich E G. Economic modelling and indicators in life cycle sustainability assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 18(9): 1710-1721.
[52] Huppes G, Ishikawa M. A framework for quantified eco-efficiency analysis. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 25-41.
[53] Kicherer A, Schaltegger S, Tschochohei H, Pozo B F. Eco-efficiency. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12: 537-537.
[54] 吕彬, 杨建新. 中国电子废物回收处理体系的生态效率分析. 环境工程学报, 2010, 4(1): 183-188.
[55] 赵薇, 孙一桢, 张文宇, 梁赛. 基于生命周期方法的生活垃圾资源化利用系统生态效率分析. 生态学报, 2016, 36(22): 7208-7216.
[56] Yang Z F, Zhou X C, Xu L Y. Eco-efficiency optimization for municipal solid waste management. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 242-249.
[57] Reich M C. Economic assessment of municipal waste management systems—case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC). Journal of Cleaner Production, 2005, 13(3): 253-263.
[58] Ibenholt K, Lindhjem H. Costs and benefits of recycling liquid board containers. Journal of Consumer Policy, 2003, 26(3): 301-325.
[59] Eshet T, Ayalon O, Shechter M. A critical review of economic valuation studies of externalities from incineration and landfilling. Waste Management & Research, 2005, 23(6): 487-504.
[60] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
[61] Allesch A, Brunner P H. Material flow analysis as a decision support tool for waste management: a literature review. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(5): 753-764.
[62] Kuo N W, Ma H W, Yang Y M, Hsiao T Y, Huang C M. An investigation on the potential of metal recovery from the municipal waste incinerator in

Taiwan. Waste Management, 2007, 27(11): 1673-1679.
[63] Hellweg S, Hofstetter T B, Hungerbühler K. Modeling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland. Environmental Modeling & Assessment, 2001, 6(4): 219-235.
[64] Andersen J K, Boldrin A, Christensen T H, Scheutz C. Mass balances and life cycle inventory of home composting of organic waste. Waste Management, 2011, 31(9): 1934-1942.
[65] Björklund A, Bjuggren C. Waste modelling using substance flow analysis and life cycle assessment.Proceedings of the Air & Waste Management Association's Annual Meeting. San Diego, CA, USA: KTH, 1998: 15-15.
[66] Rochat D, Binder C R, Diaz J, Jolliet O. Combining material flow analysis, life cycle assessment, and multiattribute utility theory——assessment of end-of-life scenarios for polyethylene terephthalate in Tunja, Colombia. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(5): 642-655.
[67] Sevigné-Itoiz E, Gasol C M, Rieradevall J, Gabarrell X. Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): case study of waste paper recycling. Journal of Cleaner Production, 2015, 105: 253-262.
[68] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 何琴, 张浩, 姜睿, 陈雪雪, 侯萍. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
[69] 龚先政, 聂祚仁, 王志宏, 高峰, 陈文娟, 左铁镛. 中国材料生命周期分析数据库开发及应用. 中国材料进展, 2011, 30(8): 1-7.
[70] Liang S, Feng T T, Qu S, Chiu A S F, Jia X F, Xu M. Developing the Chinese environmentally extended input-output (CEEIO) database. Journal of Industrial Ecology, 2017, doi: 10.1111/jiec.12477.
[71] Hendrickson C T, Lave L B, Matthews H S. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services——An Input-Output Approach. Washington, DC: Resources for the Future, 2006.
[72] Huppes G, de Koning A, Suh S, Heijungs R, van Oers L, Nielsen P, Guinée J B. Environmental impacts of consumption in the European Union: high-resolution input-output tables with detailed environmental extensions. Journal of Industrial Ecology, 2006, 10(3): 129-146.
[73] Weitz K A, Thorneloe S A, Nishtala S R, Yarkosky S, Zannes M. The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(9): 1000-1011.
[74] Gentil E, Christensen T H, Aoustin E. Greenhouse gas accounting and waste management. Waste Management & Research, 2009, 27(8): 696-706.
[75] 徐成, 杨建新, 王如松. 广汉市生活垃圾生命周期评价. 环境科学学报, 1999, 19(6): 631-635.
[76] 韦保仁, 王俊. 苏州城市生活垃圾处置方法的生命周期评价. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(2): 93-97.
[77] 李雯婧, 孙娜, 张令戈. 大连市生活垃圾处理的生命周期评价. 环境卫生工程, 2009, 17(6): 55-57.
[78] Zhao Y, Christensen T H, Lu W J, Wu H Y, Wang H T. Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City, China. Waste Management, 2011, 31(4): 793-799.
[79] Dong J, Chi Y, Zou D A, Fu C, Huang Q X, Ni M J. Comparison of municipal solid waste treatment technologies from a life cycle perspective in China. Waste Management & Research, 2014, 32(1): 13-23.
[80] Hong J L, Li X, Cui Z J. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. Waste Management, 2010, 30(11): 2362-2369.
[81] Zhao W, van der Voet E, Zhang Y F, Huppes G. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: case study of Tianjin, China. Science of the Total Environment, 2009, 407(5): 1517-1526.
[82] de Haes H A U, Jolliet O, Finnveden G, Hauschild M, Krewitt W, Müller-Wenk R. Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, 4(2): 66-74.
[83] Gentil E C, Damgaard A, Hauschild M, Finnveden C, Eriksson O, Thorneloe S, Kaplan P O, Barlaz M, Muller O, Matsui Y, Ii I, Christensen T H. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. Waste Management, 2010, 30(12): 2636-2648.
[84] Cleary J. Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: a comparative analysis of selected peer-reviewed literature. Environment International, 2009, 35(8): 1256-1266.
[85] European Union. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008. Official Journal of the European Union, L312, 2008-11-22.
[86] European Commission. Life cycle indicators for waste management: development of life cycle based macro-level monitoring indicators for resources, products and waste for the EU-27. Luxembourg: Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2012.
[87] EPAUS. Solid Waste Management and Greenhouse Gases——A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks. 3rd ed. Washington, DC: EPA, 2006.